

大连湾海底隧道沉管预制干坞坞口设计与应用

尹永欣, 张京京, 胡建波
(中交天津港湾工程设计院有限公司, 天津 300461)

摘要: 大连湾海底隧道采用沉管法建设, 由固定干坞承担18节沉管预制。坞口作为干坞与大海之间的屏障, 在挡水防浪保障坞内安全方面至关重要, 在安全、经济的前提下尚需兼顾施工便捷和使用方便。在总结国内外典型沉管预制场坞口形式的基础上, 采用固定干坞法、重力式坞口、大沉箱浮坞门方案, 坞口采用帷幕灌浆+止水带+钢闸门+混凝土结构止水体系, 设有消能式自流灌水坞门墩结构, 浮坞门沉箱采用原位现浇方案, 可为类似工程提供参考。

关键词: 坞口结构; 止水结构; 浮坞门; 超大沉箱

中图分类号: U655.4; U455.46

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0058-05

doi: 10.7640/zggwjs202410010

Design and application of dry-dock entrance for prefabricated immersed tube of Dalian Bay Subsea Tunnel

YIN Yong-xin, ZHANG Jing-jing, HU Jian-bo
(CCCC Tianjin Port Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: The Dalian Bay Subsea Tunnel is constructed using the immersed tube method, where 18 sections of immersed tubes are prefabricated using a fixed dry-dock. The dock entrance serves as a protective barrier between the dry-dock and the sea, playing a crucial role in ensuring dock safety by preventing water ingress and providing wave protection. On the premise of safety and economy, it is necessary to take into account the convenience of construction and the ease of use. On the basis of summarizing the typical dock gate types for prefabrication of immersed tubes both domestically and internationally, this project adopts the fixed dry dock method, gravity-type dock entrances, and large floating caisson gate system. The dock entrance system incorporates curtain grouting, water stop strips, steel gates, and concrete structure water stop system, and is equipped with the energy dissipation self-flowing water dock gate pier structure. The caisson of floating dock gate adopts cast-in-situ scheme, which can provide reference for similar projects.

Key words: dock entrance structure; water stop structure; floating gate; super large caisson

0 引言

沉管隧道工法为水下隧道建设的主要工法之一, 其关键工序包括管节预制、浮运、沉放对接等。沉管预制作作为隧道建设中的重点环节之一, 目前常规的沉管预制方法^[1-3]主要有工厂法、固定干坞法和移动干坞法, 其中移动干坞法受船机设备能力及水域限制而应用较少, 国内沉管隧道工程主要采用工厂法和固定干坞法进行沉管预制。

1) 工厂法

采用工厂法的沉管预制场主要包含预制厂房、

浅坞区和深坞区, 3个区域互不影响, 可以全天候进行管节预制, 形成流水线作业。丹麦厄勒海峡桥隧工程^[4]和港珠澳桥隧工程^[5]的沉管预制场均采用工厂法。

2) 固定干坞法

采用固定干坞法的沉管预制场管节在干坞场地内预制, 预制完成后对干坞注水, 注水完成后将沉管拖出干坞。按照干坞使用次数分为一次性干坞法和分批干坞法, 其中一次干坞法一般不单独设置坞门。韩国釜山沉管预制场^[6]、香港西区沉

管预制场^[7]均采用分批干坞法。南昌红谷沉管预制场由于预制批次少, 施工期间坞口需拆除一次再恢复一次, 不设置坞门。

上述 2 种沉管预制场的坞口结构见表 1。

表 1 各典型沉管预制场坞口形式
Table 1 Dock entrance forms of each typical immersed tube prefabrication yard

工程	预制工艺	出运批次/次	坞口结构	浮坞门结构
丹麦厄勒海峡隧道	工厂法	10	重力式	钢扶壁大沉箱
港珠澳隧道	工厂法	17	重力式	钢扶壁大沉箱
韩国釜山隧道	固定干坞法	4	重力式	大沉箱
香港西区隧道	固定干坞法	3	重力式	大沉箱
南昌红谷隧道	固定干坞法	2	斜坡式	无坞门

由表 1 可知, 无论是工厂法或固定干坞法, 沉管出运批次 ≥ 3 次时, 适合采用可重复使用的坞口结构; 出运次数较少时, 不设置坞门更加经济。工厂法由于坞门挡水高度更高, 一般采用钢扶壁大沉箱作为浮坞门, 固定干坞法一般采用大沉箱作为浮坞门, 两侧采用钢闸门密封。

对坞口结构而言, 止水体系安全有效、坞门便于重复启闭、结构具备安全冗余是设计中需要着重考虑的问题。本文以大连湾海底隧道沉管预制干坞为例, 对上述问题进行论述。

1 工程概况

1.1 建设规模

大连湾海底隧道工程是我国北方第一条跨海沉管隧道工程, 共有 18 节沉管, 单节沉管标准长度 180 m, 宽 33.4 m。沉管预制干坞(简称“干坞”)是为大连湾海底隧道建设而配套的沉管预制场地, 包含 2 个独立的坞室, 每个坞室可同时预制 3 节沉管, 干坞平面见图 1。坞室外侧设置坞口, 管节预制完成后通过灌水、抽水和启闭浮坞门完成管节出运, 再进行下一批管节预制的工序循环。



图 1 大连湾海底隧道干坞平面
Fig. 1 Plan of dry-dock for Dalian Bay Subsea Tunnel

1.2 坞口设计难点

本工程坞口地质条件较差, 结构形式复杂, 根据项目特点及使用需求, 坞口设计重难点如下:

1) 干坞基岩为中风化白云岩, 溶蚀和破碎带比较发育, 部分区域岩石渗透性较强, 需要采取切实有效的止水措施。

2) 根据管节宽度和出运工艺, 浮坞门尺寸需 ≥ 41 m, 且需满足快速启闭的使用需求。

3) 坞口作为干坞的挡水屏障, 结构安全性和稳定性要求均较高, 设计时既要保证安全、稳定, 又要兼顾经济性和可操作性。

4) 浮坞门需要经历多次开启及关闭, 需要采取切实有效的措施封堵安装缝, 保证坞口渗流量处于可控状态。

5) 根据使用需求, 坞口上需要设置灌水系统、沉管绞移设备和止水系统, 结构形式复杂, 需要统筹多专业设计平衡。

6) 设计同时需要考虑施工可行性, 采用常规结构结合创新施工工艺, 尽早完成坞口施工, 拆除临时围堰, 通过缩短工期创造经济价值。

1.3 坞口结构方案

沉管预制干坞的坞口结构宽 43.15 m, 顶高程 3.5 m, 由浮坞门、坞门墩、拦水沉箱和底板组成, 基础均为中风化白云岩, 设置帷幕灌浆止水, 见图 2。

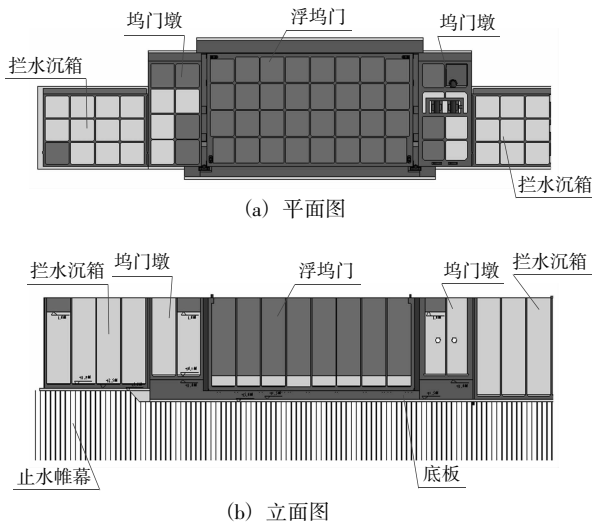


图 2 沉管预制干坞坞口结构图
Fig. 2 Structure diagram of dry-dock entrance for prefabricated immersed tube

浮坞门采用钢筋混凝土超大沉箱结构, 为满足浮坞门多次快速起浮的使用要求, 浮坞门沉箱

内回填 2 m 厚中粗砂，上部灌满海水压载，可保证坞门的稳定性；当坞门需起浮时，将沉箱内海水抽出即可，无需抽砂。在浮坞门方案设计过程中，曾考虑 1 个大沉箱和 2 个小沉箱 2 个方案进行比选。结合工程周边沉箱预制能力，考虑 1 个大沉箱具有启闭操作方便、启闭时间短、止水效果好的优点，最终决定采用 1 个大沉箱的浮坞门方案，见图 3。

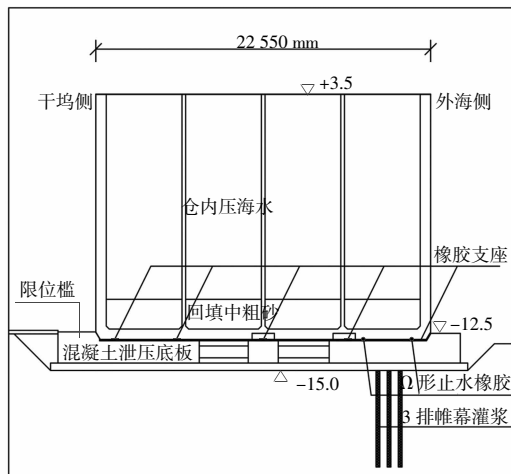


图 3 浮坞门及底板结构剖面图

Fig. 3 Section view of floating dock gate & bottom plate

浮坞门两侧为坞门墩，坞门墩沉箱内回填开山石渣，坞门墩下方为混凝土基础，与浮坞门底板整体浇筑连成一体。坞门墩沉箱内部设置 2 根直径 1 m 的进水管并设阀门井，内侧仓格不填料保持空仓作为消能进水井，形成一种消能式自流灌水坞门墩，见图 4。

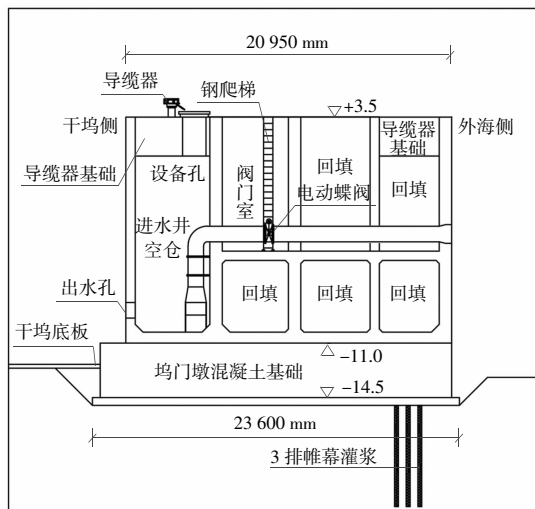


图 4 坞门墩结构剖面图

Fig. 4 Section view of dock gate pier structure

拦水沉箱内回填开山石渣，底部为 0.5 m 素混凝土垫层，垫层下方为中风化白云岩基础。拦水沉箱为固定沉箱，在内外水位压力差作用下依靠自身重量保持稳定。

坞口上根据工艺需求布置系船柱、系船环、卷扬机、导缆器、栏杆等配套设施。

2 坞口设计要点

2.1 坞口止水体系

止水体系的可靠性是坞口设计成败的关键之一，本工程坞口止水体系设计如下：

1) 坞口各沉箱基床均采用块石升浆或混凝土结构，基床下方坐落在中风化白云岩，溶蚀和破碎带发育，通过前期地勘压水试验可知部分区域岩石渗透性较强。为保证止水效果，岩层均采用 3 排帷幕灌浆止水，并在底板与基岩之间增加接触灌浆。

2) 拦水沉箱和土石护岸之间采用预埋止水钢片打设旋喷桩的方式止水。

3) 坞门墩和拦水沉箱中间设置企口并预埋橡胶止水带，企口之间浇筑混凝土，止水带延伸到帷幕灌浆中心。

4) 浮坞门需多次启闭，因此浮坞门与坞门墩之间需保持 1 m 的安装缝。安装缝采用钢闸门止水，钢闸门立面布置橡胶止水带，通过水压力和预紧拉力压缩止水橡胶进行止水。坞门墩和浮坞门沉箱之间设置 1 组对应备用止水空腔，在钢闸门渗漏较大时进行止水并对钢闸门进行维修。

5) 浮坞门沉箱下方设置混凝土基础底板，底板与浮坞门之间设置橡胶支座和 2 道 Ω 形止水带 (1 道作为备用)，通过浮坞门大沉箱重力压缩止水橡胶进行止水，见图 5。

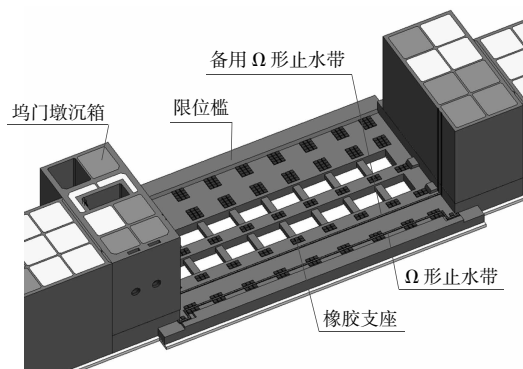


图 5 坞口底板结构效果图

Fig. 5 Structural diagram of bottom plate of dry-dock entrance

2.2 浮坞门及底板稳定性设计

当干坞内沉管预制时,坞内无水,因此坞口结构需满足外侧水压力和底部扬压力作用下的自身稳定。其中拦水沉箱以自身重量保持稳定,而浮坞门、坞门墩通过一体浇筑的底板组成整体,需综合考虑其稳定性。从整体受力角度,当浮坞门坐落在底板上时,浮坞门、坞门墩及底板形成的整体结构在外部水压力、底部扬压力作用下可保持抗倾覆和抗滑移稳定性,且底板与基础之间不产生拉应力。但此结构体系仍面临以下挑战:

1) 浮坞门底部需设 Ω 形止水带,但止水带难以承受浮坞门自身重量产生的巨大压力。解决措施:在底板上设橡胶支座,保证浮坞门荷载通过橡胶支座作用在底板上,并协调 Ω 形止水带的压缩量。

2) 浮坞门沉箱经海水压载后,可保持抗倾覆稳定性,但由于沉箱与底板之间有橡胶支座和2道 Ω 形止水带,无法承受水平力。解决措施:在底板上设置混凝土限位槛,浮坞门沉箱底部设置斜面匹配,既保证浮坞门安装落位时精准定位,又防止浮坞门在外侧巨大水压力下向坞内侧方向滑移。

3) 浮坞门下方的混凝土底板最初设计为实体钢筋混凝土结构。由于底板与中风化岩均为相对不透水层,浮坞门落位后,在长时间作用下底板下方产生较大的扬压力,此时依靠浮坞门重量压载,底板可保证受力安全。但当浮坞门起浮后,下部扬压力不能及时消散,可能使底板产生隆起破坏。解决措施:将浮坞门底板做成框格透空式结构,增加减压排水效果,底板本身不承受渗透扬压力。少量渗水可通过橡胶支支撑起的缝隙排入干坞内及时抽走。

2.3 浮坞门原位现浇方案

干坞施工期,在坞口设置斜坡式临时围堰,形成干作业施工条件,因此坞门墩及拦水沉箱、底板均采用现浇结构。浮坞门为超大沉箱,平面尺度为41.15 m×22.55 m,重达7 800 t,已超出周边沉箱预制场的预制能力。按照常规施工工艺,由于底板上设有橡胶支座和止水带,不能直接在底板上浇筑浮坞门沉箱,应利用临时围堰形成的干作业条件,在围堰内另行设置现浇场地,沉箱浇筑完成后,拆除临时围堰使沉箱起浮,再进行落位安装。

但此方案存在2个问题:1) 临时围堰内施工空间有限,另行设置现浇场地将增加围堰长度,大幅增加土石料用量;2) 浮坞门落位安装后无法对止水效果进行检验。

通过与施工单位共同研究,最终确定采用浮坞门原位现浇方案。采用此方案,既节约了工期和投资,又在施工期有效检验了止水体系的效果。具体方法如下^[8]:1) 底板施工时预留千斤顶廊道;2) 橡胶支座和止水带安装完成后,利用预留廊道设置千斤顶,并铺设砂垫层以使橡胶支座及止水带不受压,再铺设竹胶板底模并密封;3) 绑扎钢筋并浇筑浮坞门沉箱第1层混凝土;4) 沉箱第1层混凝土达到设计强度后,利用千斤顶顶升并设置混凝土垫墩,然后清除底部砂垫层及底模,沉箱第1层重量应满足止水带压缩要求;5) 利用千斤顶移除垫墩,并使沉箱落位至橡胶支座上,止水带压缩达到变形要求;6) 向坞口与临时围堰形成的空间内灌水,进行水密试验,检验底板止水体系的效果;7) 抽水后将浮坞门沉箱接高层现浇成型;8) 再次向坞口与临时围堰形成的空间内灌水,进行二次水密试验。试验完成后再拆除临时围堰。

2.4 坞口结构计算

1) 坞口沉箱计算

坞口浮坞门及坞门墩沉箱均需进行整体稳定计算,包括抗倾覆稳定性、抗滑移稳定性、抗浮稳定性,荷载需考虑自重力、侧向水压力、扬压力、设备荷载。沉箱构件计算时需考虑自重力、水压力、贮仓压力。

2) 坞口底板构件计算

采用MIDAS Civil有限元软件进行结构分析。坞口底板采用板壳单元简化,计算时需考虑自重力、支座荷载、扬压力,上方沉箱压力通过橡胶支座传递至底板。经计算及优化,底板厚度为1.5 m,连系梁高度为0.8 m。

3) 钢闸门构件计算

钢闸门各构件均采用板壳单元简化,主要受到外侧水压力作用。钢闸门最大组合应力为245.23 MPa(见图6),最大变形量为1.53 mm,均满足设计要求。

4) 浮坞门施工期核算

施工期浮坞门受力与使用期不同,需要对顶升工况下浮坞门第1层结构进行强度核算。浮坞

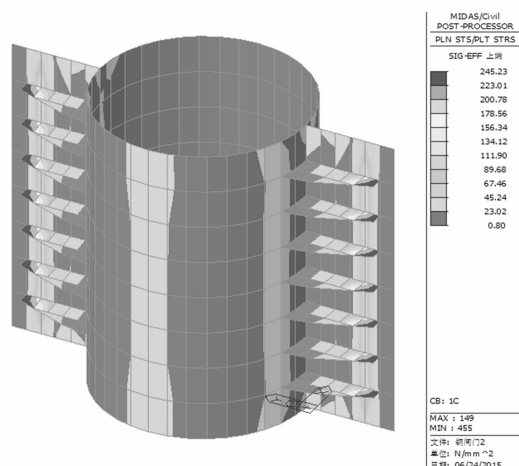


图6 钢闸门应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of steel gate

门受到自重(第1层混凝土)、施工荷载、顶升荷载。经过核算,浮坞门沉箱构件强度在顶升工况下承载力满足规范要求。

3 应用效果

大连湾海底隧道工程18节沉管采用固定干坞法预制,坞口采用重力式沉箱结构,浮坞门沉箱均经过3次以上启闭,高效安全,防渗漏效果好,发挥了良好的挡水和出运功能。

1) 施工期通过坞门原位现浇方案,解决了超大沉箱缺乏预制场地的问题,节约了工期,并对坞门止水体系进行了有效的检验。

2) 浮坞门沉箱采用海水和砂进行压载,通过水泵排水完成坞门起浮和落位,卷扬机及导缆器配合浮坞门移位,实现了坞门快速启闭。

3) 采用消能式自流灌水坞门墩,干坞灌水时无需水泵,节约能耗。

4) 坞口采用的帷幕灌浆+止水带+钢闸门+混凝土结构止水体系,止水效果良好。坞口止水与坞壁止水形成整个干坞的止水体系,沉管预制过程中,单个坞室渗水量 ≤ 1 万 m^3/d 。

5) 干坞坞内抽水后,浮坞门沉箱在外侧水压力的作用下,紧压在坞口底板限位槛上,验证了限位槛在保证浮坞门抗滑稳定性方面的作用。

4 结语

1) 止水体系的有效性是干坞防渗漏的关键。坞口采用帷幕灌浆+止水带+钢闸门+混凝土结构止水,效果良好。

2) 超大沉箱浮坞门采用原位现浇工艺,既节

约了造价和工期,又保证了止水效果的可检验性。

3) 底板设置泄压孔和限位槛,保证了浮坞门结构的稳定性,且方便沉箱启闭安装时精准落位。

本文搜集了国内外典型沉管预制场资料,经过分析比较,将成熟经验应用于大连湾海底隧道沉管预制干坞坞口设计中。同时根据本工程特点,分析坞口设计重难点并提出解决措施,总结了一些设计经验,希望对以后类似工程提供一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 毛剑峰,邓涛. 沉管隧道管节预制方法综述[J]. 交通科技, 2013(6): 79-82.
MAO Jian-feng, DENG Tao. Comprehensive summary of precast method of immersed tube section[J]. Transportation Science & Technology, 2013(6): 79-82.
- [2] 王晓东,李洪斌. 沉管隧道钢筋混凝土管节预制及下水工艺比选研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S1): 449-458.
WANG Xiao-dong, LI Hong-bin. Comparative study on prefabrication & water-entry technology of reinforced concrete element of immersed tunnel[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 449-458.
- [3] 杨文武. 沉管隧道工程技术的发展[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 397-404.
YANG Wen-wu. Development of immersed tube tunneling technology[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4): 397-404.
- [4] 肖晓春. 大型沉管隧道管节工厂化预制关键技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(6): 701-705.
XIAO Xiao-chun. Key technology for manufactory prefabrication of tube elements of large-scale immersed tunnels[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(6): 701-705.
- [5] 林巍,林鸣,梁杰忠,等. 沉管隧道整体管节工厂预制方法[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(2): 55-61.
LIN Wei, LIN Ming, LIANG Jie-zhong, et al. Factory method for immersed tunnel monolithic element prefabrication[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(2): 55-61.
- [6] 张志刚,刘洪洲. 公路沉管隧道的发展及其关键技术[J]. 隧道建设, 2013, 33(5): 343-347.
ZHANG Zhi-gang, LIU Hong-zhou. Development and key technologies of immersed highway tunnels[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(5): 343-347.
- [7] 杨文武,毛儒,曾楚坚,等. 香港海底沉管隧道工程发展概述[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(S1): 41-46.
YANG Wen-wu, MAO Ru, ZENG Chu-jian, et al. Overview of sub-sea immersed tube tunnel development in Hong Kong[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(S1): 41-46.
- [8] 王坤,张超,董天杰. 浮坞门沉箱原位现浇及顶升施工技术[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(11): 46-49.
WANG Kun, ZHANG Chao, DONG Tian-jie. Cast-in-situ and jacking construction technology of caisson of floating dock gate[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(11): 46-49.